

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Vojtech Sabatula



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**LABORATORNÍ ÚLOHA DEMONSTRUJÍCÍ VLASTNOSTI
SYMETRICKÝCH PROPOJENÍ**

LABORATORY EXERCISE DEMONSTRATING PROPERTIES OF BALANCED CONNECTIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtech Sabatula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Kubánek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Vojtech Sabatula

ID: 211563

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha demonstrující vlastnosti symetrických propojení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte princip a vlastnosti symetrických propojení výstupů a vstupů zvukových zařízení. Popište, za jakým účelem se používají a jakým nežádoucím jevům zabraňují. Zaměřte se především na činitel potlačení souhlasného napětí a prozkoumejte, jak závisí např. na vstupních a výstupních odporech na koncích propojení, zesílení a lomovém kmitočtu použitého zesilovače apod. Uvedené poznatky podložte počítačovými simulacemi. Zpracujte laboratorní úlohu a k ní vhodný měřicí přípravek, na němž demonstřujete popsané vlastnosti symetrických propojení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SELF, Douglas. Small signal audio design. Burlington, MA: Focal Press, 2010. ISBN 0240521773.

[2] VRBA, Kamil. Konstrukce elektronických zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN: 978-8-214-4719-6.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Cieľom tejto práce je preštudovať princípy a vlastnosti symetrických prepojení výstupov a vstupov zvukových zariadení a zhrnúť teoretické poznatky v tejto oblasti. Práca sa zameriava predovšetkým na činiteľ potlačenia súhlasného napätia a skúma vplyv výstupných a vstupných odporov, zosilnenia a lomového kmitočtu použitého zosilňovača. Uvedené poznatky dokladá počítačovými simuláciami a meraniami na zhotovenom prípravku.

Kľúčové slová

CMRR, pomer potlačenia súhlasného napätia, symetrické prepojenie, operačný zosilňovač

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to study the principle and properties of balanced interconnections of outputs and inputs, sound devices and to summarize theoretical knowledge in this area. It focuses mainly on the factor of common-mode rejection and the influence of output and input resistances amplification and pole frequency of the used amplifier. Computer simulations and measurements on prepared electronic circuits prove the mentioned knowledge.

Keywords

CMRR, common-mode rejection ratio, balanced interconnection, operational amplifier

Bibliografická citácia

SABATULA, Vojtech. Laboratorní úloha demonstrující vlastnosti symetrických propojení [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133477>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. David Kubánek, Ph.D.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	<i>Vojtech Sabatula</i>
VUT ID študenta:	<i>211563</i>
Typ práce:	<i>Bakalárska práca</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma záverečnej práce:	<i>Laboratorní úloha demonstrující vlastnosti symetrických propojení</i>

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zoznamu literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časť druhá, hlavy VI. diel 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 30. mája 2021

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Davidovi Kubánkovi, Ph.D. za odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní tejto bakalárskej práce.

V Brne dňa: 30. mája 2021

podpis autora

Obsah

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	8
ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. NESYMETRICKÝ PRENOS AUDIO SIGNÁLU	12
1.1 NESYMETRICKÉ KONEKTORY	13
1.2 VÝHODY NESYMETRICKÝCH PREPOJENÍ	13
1.3 NEVÝHODY NESYMETRICKÝCH PREPOJENÍ	14
1.4 SYMETRICKÝ PRENOS NESYMETRICKÉHO SIGNÁLU	14
2. SYMETRICKÝ PRENOS AUDIO SIGNÁLU	15
2.1 SYMETRICKÉ KONEKTORY	17
2.2 VÝHODY SYMETRICKÝCH PREPOJENÍ	17
2.3 NEVÝHODY SYMETRICKÝCH PREPOJENÍ	18
2.4 ÚROVNE SYMETRICKÉHO SIGNÁLU	18
2.5 ELEKTRONICKÝ VS. TRANSFORMÁTOROVÝ SYMETRICKÝ VSTUP	18
3. POMER POTLAČENIA SÚHLASNÉHO NAPÄTIA	19
3.1 VPLYV ZOSILŇOVAČA NA CMRR	22
3.2 VPLYV FREKVENCIE PÓLU NA CMRR	24
4. SIMULÁCIE V PROGRAME MICRO-CAP	26
4.1 VPLYV ODCHÝLKY ODPOROV NA CMRR BEZ OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA	26
4.1.1 Porovnanie s výsledkami z knihy <i>Small signal audio design</i>	28
4.2 VPLYV ZOSILNENIA OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA NA CMRR	28
4.2.1 Porovnanie s výsledkami z knihy <i>Small signal audio design</i>	30
4.3 VPLYV ODCHÝLKY VSTUPNÝCH ODPOROV A ZOSILNENIA NA CMRR	30
4.3.1 Porovnanie s výsledkami z knihy <i>Small signal audio design</i>	31
5. MERANIA OBVODU NA NEPÁJIVOM POLI	32
5.1 POUŽITÉ SÚČIASTKY A PRÍSTROJE	32
5.2 VPLYV ODCHÝLKY ODPOROV NA CMRR BEZ OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA	32
5.3 VPLYV ODCHÝLKY VSTUPNÝCH ODPOROV NA CMRR	33
5.4 ŠÍRKA PÁSMO PRENOSU U OZ TL071CP	34
6. LABORATÓRNA ÚLOHA DEMONŠTRUJÚCA VLASTNOSTI SYMETRICKÝCH PREPOJENÍ	35
ZÁVER	37
LITERATÚRA	38
ZOZNAM PRÍLOH	39

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

CMRR	Pomer potlačenia súhlasného napätia
OZ	Operačný zosilňovač

Symboly:

U	napätie	[V]
R	odpor	[Ω]

ZOZNAM OBRÁZKOV

OBRÁZOK 1-1 NESYMETRICKÝ VSTUP S NÁLEŽITÝMI KOMPONENTMI [1]	12
OBRÁZOK 2-1 ZÁKLADNÝ SYMETRICKÝ VSTUPNÝ ZOSILŇOVAČ [1]	15
OBRÁZOK 2-2 PREPOJENIE NESYMETRICKÉHO RCA A SYMETRICKÉHO XLR KONEKTORA [1]	17
OBRÁZOK 3-1 TEORETICKÉ SYMETRICKÉ PREPOJENIE PRE ZNÁZORNENIE VPLYVU IMPEDANCIÍ NA CMRR [1]	20
OBRÁZOK 3-2 JEDNODUCHÉ SYMETRICKÉ PREPOJENIE NA ZOBRAZENIE VPLYVU VLASTNOSTÍ OZ NA CMRR [1]	23
OBRÁZOK 3-3 GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE DEGRADOVANIA CMRR S ROZDIELNOU FREKVENCIOU PÓLU	24
OBRÁZOK 4-1 SIMULOVANÝ OBVOD BEZ OPERAČNÉ ZOSILŇOVAČA	26
OBRÁZOK 4-2 SIMULOVANÝ OBVOD S OPERAČNÝM ZOSILŇOVAČOM	29
OBRÁZOK 5-1 ZÁVISLOSŤ CMRR NA FREKVENCII U OZ TL071CP	34

ZOZNAM TABULIEK

TABUĽKA 2-1 VSTUPNÉ IMPEDANCIE PRE ROZDIELNE PODMIENKY ZAPOJENIA VSTUPU [1]	16
TABUĽKA 3-1 VPLYV ODCHÝLKY ODPOROV NA TEORETICKÉ CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 3-1 [1].....	21
TABUĽKA 3-2 VPLYV ZOSILNENIA OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA NA CMRR PRE OBVOD Z OBRÁZKU 3-2 [1]	23
TABUĽKA 3-3 VPLYV FREKVENCIE PÓLU OZ NA CMRR	24
TABUĽKA 3-4 ZOSILNENIA A FREKVENCIE PÓLU PRE TYPICKY VYUŽÍVANÉ OZ V AUDIO ZARIADENIACH	25
TABUĽKA 4-1 SIMULOVANÝ VPLYV ODCHÝLKY ODPOROV NA CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 4-1	27
TABUĽKA 4-2 SIMULOVANÝ VPLYV ZOSILNENIA OPERAČNÉHO ZOSILŇOVAČA NA CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 4-2	29
TABUĽKA 4-3 SIMULOVANÝ VPLYV ODCHÝLKY VSTUPNÝCH ODPOROV A ZOSILNENIA NA CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 4-230	
TABUĽKA 5-1 ZMERANÝ VPLYV ODCHÝLKY ODPOROV NA CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 4-1.....	33
TABUĽKA 5-2 ZMERANÝ VPLYV ODCHÝLKY VSTUPNÝCH ODPOROV A ZOSILNENIA NA CMRR PRI ZAPOJENÍ Z OBRÁZKU 4-2 ...	34

ÚVOD

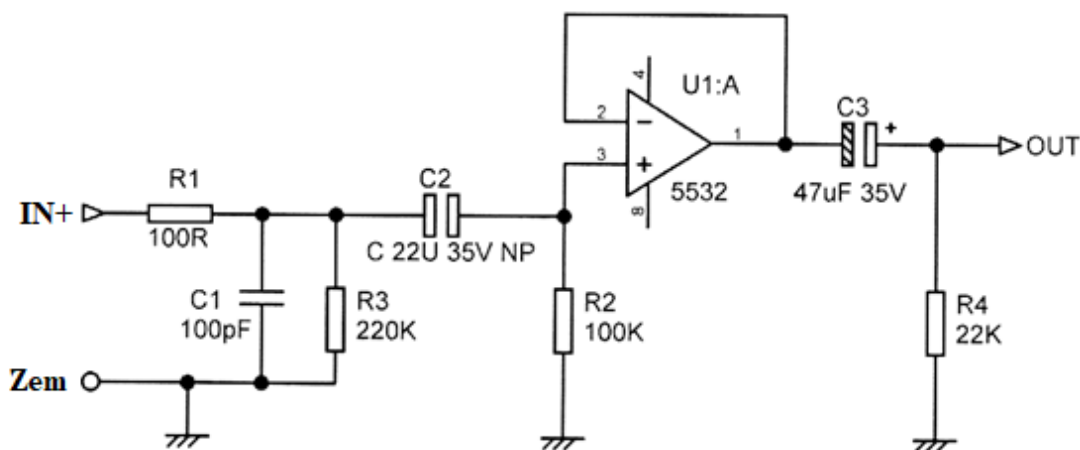
Práca si dáva za cieľ preštudovať princíp a vlastnosti symetrických prepojení výstupov a vstupov zvukových zariadení a zhrnúť teoretické poznatky v tejto oblasti. Ďalej popísať, za akým účelom sa využívajú a akým nežiadúcim vplyvom zabraňujú. Zamerať sa predovšetkým na činiteľ potlačenia súhlasného napätia a skúmať vplyv výstupných a vstupných odporov, zosilnenia a lomového kmitočtu použitého zosilňovača. Uvedené poznatky doložiť počítačovými simuláciami a meraniami na prípravku. Týmto chce pripraviť podklad pre vytvorenie laboratórnej úlohy.

Práca je rozdelená do troch častí. Prvá časť sa venuje teórii symetrických prepojení, ich výhodám a nevýhodám, konštrukcii, vlastnostiam a činiteľu potlačenia súhlasného napätia. Druhá časť začínajúca od kapitoly 4 meria simulované aj reálne zhotovené obvody, hľadá riešenia pre čo najlepší výsledok parametru CMRR a namerané hodnoty porovnáva s výsledkami z knihy Small signal audio design [1]. Tretia časť v podobe šiestej kapitoly sa venuje návrhu laboratórnej úlohy demonštrujúcej vlastnosti symetrických prepojení.

1. NESYMETRICKÝ PRENOS AUDIO SIGNÁLU

Existuje niekoľko štandardov pre linkové úrovne signálu. Poloprofesionálne záznamové zariadenia využívajú štandard -10 dB_U , pretože poskytuje viac priestoru pre nesymetrické zapojenie. V profesionálnych zariadeniach s úrovňou 4 dB_U a 6 dB_U sa predpokladá symetrický prepojenie a s ním aj dvojnásobná úroveň signálu. Úroveň signálu 0 dB_U odpovedá hodnote $0,775\text{ V}_{\text{RMS}}$. Táto hodnota je historicky daná z výkonu 1 mW pri záťaži $600\ \Omega$. [1]

V každom audio systéme je potrebné zvoliť vhodnú nominálnu úroveň pre prenášaný signál. Táto úroveň je vždy kompromisom medzi vysokou úrovňou, ktorá je menej náchylná na degradáciu šumom obvodu, ale nie príliš vysokou úrovňou, aby v signále nedošlo k orezaniu. [1]



Obrázok 1-1 Nesymetrický vstup s náležitými komponentmi [1]

Na obrázku 1-1 môžeme vidieť nesymetrický vstupný zosilňovač s potrebnými komponentmi pre ďalšie použitie. Operačný zosilňovač U1:A v tomto zapojení funguje ako sledovač napätia a je možné ho ľahko zmeniť, aby zosilňoval signál pridaním spätnoväzbových odporov. Bipolárny typ 5532 je zvolený pre jeho nízky šum s nízkymi impedanciami zdroja, ktoré sú v tomto prípade predpokladané a vstupný FET zosilňovač by v tomto prípade prinášal asi o 10 dB vyšší šum. R1 a C1 sú filter dolnej prepusti prvého rádu pre odstránenie rušenia rádiovými frekvenciami ešte predtým, ako by dostali šancu dosiahnuť operačný zosilňovač a demodulovať do zvukového pásma. Akonáhle by k tomu došlo, sú ďalšie pokusy o filtrovanie RF zbytočné, preto R1 a C1 musia byť čo najbližšie k vstupu, aby sa čo najviac zabránilo vyžarovaniu RF vnútri zariadenia. [1]

Výber hodnôt pre vstupné filtre tohto druhu je vždy kompromisom, pretože výstupná impedancia zdrojového zariadenia nie je známa. V prípade zdroja s aktívnym predzosilňovačom bude výstupná impedancia pravdepodobne $50\ \Omega$, ale v rôznych prípadoch môže dosahovať hodnôt aj viac ako $500\ \Omega$. [1]

Úlohou kondenzátora C2 je blokovat' jednosmerný prúd, ktorý by sa mohol dostať do obvodu z pripojeného zariadenia. Jedná sa o nepolarizovaný typ, keďže nevieme predpokladať polaritu a je dimenzovaný najmenej na 35 V. Táto hodnota by mala byť dostačujúca aj pre ochranu pred pripojením chybného zariadenia a mala by predísť nežiadúcemu poškodeniu. Odpor R3 zabezpečuje vybitie kondenzátora C2 v prípade pripojenia takéhoto chybného zariadenia skôr, než urobí nejakú škodu pri dlhšom zapojení. Jeho hodnota je volená ako kompromis medzi primerane rýchlym vybitím kondenzátora a udržaním prijateľne vysokej vstupnej impedancie. Vstupná impedancia R3 s hodnotou 220 k Ω je paralelne zapojená s R2 s hodnotou 100 k Ω , čo nám spolu dáva 68 k Ω . Táto hodnota by mala byť dostatočne vysoká, aby dobre fungovala s takmer akýmkoľvek zdrojovým zariadením. [1]

1.1 Nesymetrické konektory

Medzi najčastejšie používané nesymetrické konektory radíme TS a RCA konektory. Názov TS je skratka z tip-sleeve, čo je pomenovanie častí konektora. Tip – špička, prenáša signál a sleeve – rukáv je určená na prepojenie zeme. Primárne existujú v 2 veľkostiach a to s priemerom 3,5 mm a 6,35 mm. RCA konektory sa najčastejšie používajú vo dvojici s červeným a bielym označením, kde červený je pre pravý a biely pre ľavý kanál v prípade prenášania stereo signálu. Nesymetrický signál nie je vhodné prenášať na dlhé vzdialenosti, keďže nie je chránený pred rušením a teda aj káble s týmito konektormi typicky nájdeme s dĺžkou v jednotkách metrov.

V prípade nesymetrického prepojenia môžeme využiť aj symetrické konektory, napríklad TRS na prenos stereo audia, resp. dvoch kanálov. Oproti TS pribudne ring, čo je stredný prstenec určený na prenášanie signálu s opačnou fázou u symetrického pripojenia alebo druhého signálu u nesymetrického pripojenia. Je potrebná dať si pozor, aby sme takýto signál prinášali do vstupu na to určeného, inak by sme mohli úplne stratiť jeden kanál alebo ich prípadne odčítaním spojiť do jedného.

1.2 Výhody nesymetrických prepojení

- Lacnejší vstupný obvod
- Menší priemer vodiča
- Menšia váha
- Nižšie výrobné náklady
- Vylúčené zlé zapojenie a nasledovné otočenia fázy signálu, ak nevyužívame symetrické konektory
- Možnosť využiť symetrické konektory

1.3 Nevýhody nesymetrických prepojení

- Nevhodné prenášať signál na väčšia vzdialenosti
- Nižšia hladina signálu
- Nižšia kvalita prenosu

1.4 Symetrický prenos nesymetrického signálu

V prípade potreby prenášať nesymetrický signál na dlhšie vzdialenosti, prípadne zrovnať hlasitostné rozdiely pred vstupom do zariadenia ako je napríklad mixážny pult, je možné použiť zariadenie známe ako DI box. Názov je skratka z anglického direct injection box.

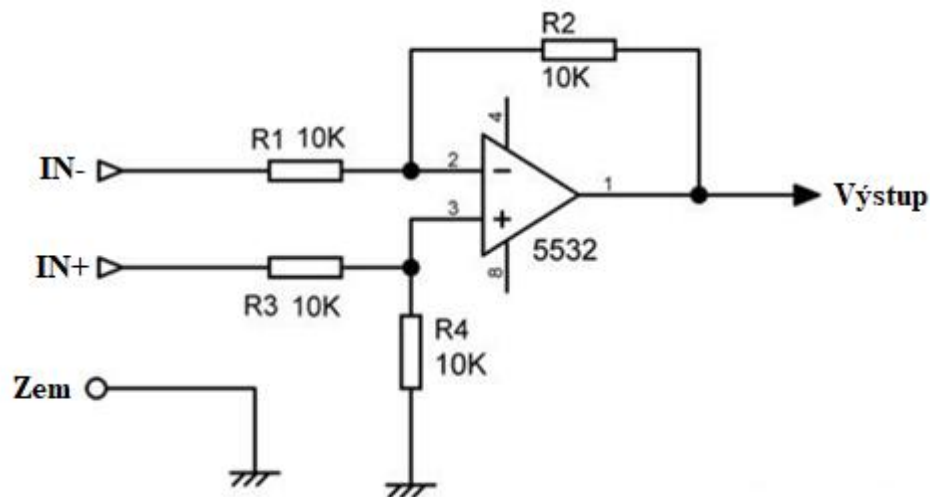
Pasívna verzia nevyžaduje žiadnu formu napájania, čo zlepšuje jej cenu, ale zhoršuje kvalitu a počet funkcií ako napríklad vynechanie predzosilňovača.

Aktívny DI box vyžaduje napájanie cez jeho symetrický výstup pripojený k vstupu mixážneho pultu s fantómovým napájaním alebo pomocou bateriek. Možná je aj kombinácia ako poistenie pre prípad chyby jednej z možností napájania. Menej typické je zapojenie priamo do elektrickej zásuvky. Na jeho vstup môžeme priviesť ako symetrický, tak nesymetrický signál a v prípade potreby galvanicky oddeliť zemnenie prepojených zariadení. Tieto funkcie sa môžu líšiť s výrobcom a jednotlivými modelmi, ale základnou funkciou zariadenia je zmena nesymetrického vedenia na symetrické. Vstupná časť zvykne obsahovať nastaviteľný útlmový článok, oddeľovací zosilňovač alebo v prípade jednoduchších verzií emitorový sledovač, ďalej oddeľovací člen v podobe transformátora, výstupný symetrický zosilňovač a obvod fantómového napájania. Schéma zariadenia sa často nachádza na jeho spodnej strane.

2. SYMETRICKÝ PRENOS AUDIO SIGNÁLU

Symetrické vstupy sa používajú pre ich odolnosť voči šumu a presluchom ovplyvňovať užitočný signál. S narastajúcou dĺžkou vedenia narastá aj dôležitosť tohto aspektu. Profesionálne zvukové vybavenie využíva symetrické prepojenie štandardne a stáva sa čoraz bežnejším aj mimo profesionálne využitie a keďže kvalita celého audia reťazca je iba tak dobrá ako jeho najslabší článok, symetrické prepojenie je kľúčové. [1]

Základným princípom symetrického prepojenia je získať požadovaný signál odčítaním napätí z dvoch, navzájom inverzných vodičov. Na toto vedenie sa môže namodulovať akékoľvek šumové napätie, ktoré je teoreticky identické na linkách hot a cold. Keďže na linke cold je signál otočený v proti fáze oproti signálu na linke hot, pri vzájomnom odčítaní napätí sa vyruší zhodne namodulovaný signál na oboch vodičoch a sčíta užitočný signál hot s inverzným cold. Tým dosiahneme okrem vyrušenia namodulovaného rušivého signálu aj druhú dôležitú výhodu oproti nesymetrickému prepojeniu, a to že výstupný signál bude vo výsledku o 6 dB hlasnejší. Vodič hot je často označovaný aj ako IN+ a cold ako IN-. [1]



Obrázok 2-1 Základný symetrický vstupný zosilňovač [1]

Obrázok 2-1 zobrazuje základný symetrický vstupný zosilňovač využívajúci jeden operačný zosilňovač. Pre dosiahnutie rovnováhy R1 sa musí rovnať R3 a R2 sa musí rovnať R4. Tento jednoduchý diferenciálny zosilňovač má interakciu medzi jeho vstupmi a teda vstupná impedancia na cold alebo IN- vstupe závisí od signálu na vstupe hot alebo tiež IN+. Táto impedancia sa meria aplikovaním signálu a meraním prúdu na vstupe zariadenia. Z toho vyplýva, že vstupná impedancia sa líši na oboch linkách podľa pripojenia na IN- linke. Ak je zosilňovač vyrobený so štyrmi 10 kΩ rezistormi, potom sú vstupné impedancie linky hot a cold ako je zobrazené v tabuľke 2-1. [1]

Tabuľka 2-1 Vstupné impedancie pre rozdielne podmienky zapojenia vstupu [1]

Prípado	Zapojenie	R _{HOT} (kΩ)	R _{COLD} (kΩ)
1	Iba hot	20	uzemnené
2	Iba cold	uzemnené	10
3	Oba symetricky	20	6,66
4	Oba súhlasne	20	20
5	Bez zeme	10	10

V prvom prípade podľa tabuľky 2-1 je symetrický vstup použitý ako nesymetrický a linka cold je uzemnená a používa sa iba linka hot. Vstupná impedancia je preto jednoducho $R_3 + R_4$. R_3 a R_4 takto znižujú signál o polovicu, ale táto strata je napravená odpormi R_1 a R_2 , ktoré zdvojnásobujú zosilnenie operačného zosilňovača a celkový výsledok ostane nepozmenený. Ak cold vstup nie je uzemnený, potom je zosilnenie polovičné. Táto konfigurácia má ale vyšší šum ako nesymetrické zapojenie na obrázku 1-1 s použitím iba jedného 100 Ω rezistoru. [1]

V druhom prípade sa znova symetrický vstup používa ako nesymetrický, tentokrát je ale uzemnený vodič hot a napájaný vstup cold. To nám zavádza fázovú inverziu, ktorá je vo väčšine prípadov nežiadúca. Dôležité je, že vstupná impedancia je v tomto prípade iba 10 kΩ, čo je hodnota R_1 . Je to z dôvodu, že negatívna spätná väzba cez R_2 vytvára virtuálnu zem na vstupe 2 operačného zosilňovača. Zosilnenie ostáva rovnaké, či je linka hot uzemnená alebo nie. Toto uzemnenie je žiadúce, pretože nezabraňuje iba zachytávaniu rušenia na linke hot, ale tiež dáva R_3 a R_4 do paralelného zapojenia, čím sa znižuje odpor operačného zosilňovača medzi vstupom 3 a zemou, a tým sa znižuje Johnsonov šum¹. [1]

Tretí prípad popisuje štandardné symetrické prepojenie. Vstup je napájaný symetrickým výstupom, na ktorom sú rovnaké úrovne signálu na oboch linkách. Vstupná impedancia na kladnej linke odpovedá očakávaným 20 kΩ. Na zápornej linke je to 6,66 kΩ, čo môže byť prekvapujúce, ale kvôli zapojeniu na invertujúci vstup zosilňovača s pohybom v opačnom smere, kvôli negatívnej spätnej väzbe dochádza k takzvanému anti-bootstrappingu, ktorý znižuje efektívnu hodnotu z 10 kΩ na 6,66 kΩ. [1]

V štvrtom prípade je na oba vstupy privádzaný rovnaký signál, ktorý predstavuje súhlasné napätie. Oba vstupy vykazujú impedanciu 20 kΩ. Efektivitu potlačania súhlasného napätia určuje práve vyváženosť oboch vstupov. Táto konfigurácia sa využíva iba na testovanie pomeru potlačenia súhlasného napätia. [1]

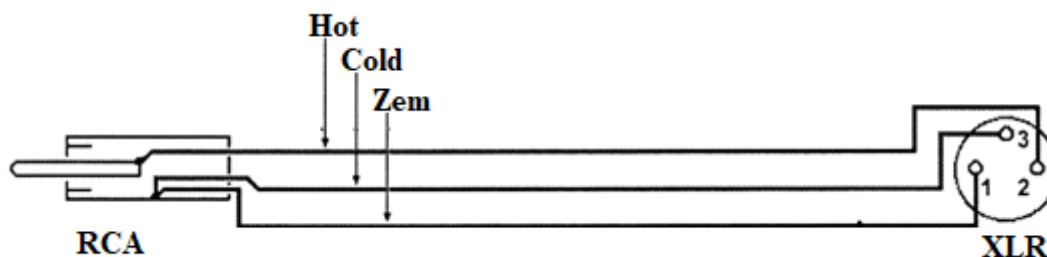
Piaty prípad zobrazuje situáciu bez zapojenej zeme. Vstupné impedancie môžeme považovať za rovnaké avšak v tomto prípade nie sú linkové napätia vôbec rovnaké, skôr opačne. Na linke hot je všetko signálové napätie a kvôli negatívnej spätnej väzbe

¹ Johnsonov-Nyquistov alebo aj tepelný šum je najčastejší šum v elektronických obvodoch a vzniká na všetkých odporoch v obvode. Jeho frekvenčnú charakteristiku môžeme prirovnať približne k bielemu šumu. [2]

vyváženého vstupného zosilňovača na linke cold žiadne signálov napätie. Aj keď je takto nevyvážený vstup, pomer potlačenia súhlasného napätia zostáva dobrý.

2.1 Symetrické konektory

Medzi najčastejšie vyžívané konektory určite patrí XLR, ktorý má aj rôzne iné označenia ako canon a mikrofónový kábel a TRS, ktorý môžeme poznať aj ako stereo jack (v tomto prípade sa ale jedná o nesymetrické zapojenie). Nesymetrický konektor RCA má veľkú nevýhodu v tom, že pri prepájaní s aktívnym systémom, čo sa neodporúča, sa pri zasúvaní konektoru signálové cesty spoja skôr ako uzemňovacie. Tým môže dochádzať k rôznemu praskaniu a nasledovnému poškodeniu ďalších zariadení ako sú napríklad reproduktory. Konektor XLR má štandardne Pin 1 ako uzemňovací, Pin 2 ako hot, tiež označovaný IN+ po ktorom prenášame signál vo fáze a Pin 3 ako cold tiež označovaný IN– po ktorom prenášame signál v protifáze. TRS konektory sa často používajú pre signál na linkovej úrovni v nahrávacom prostredí a často sa nachádzajú na zadnej strane profesionálnych zariadení ako alternatíva k XLR konektorom. Používajú sa v plnej veľkosti 6,35 mm alebo menšie 3,5 mm. V tomto prípade je tip – špička ako hot (IN+), ring – krúžok pre cold (IN–) so signálom v protifáze a sleeve – rukáv ako uzemňovacia časť. [1]



Obrázok 2-2 Prepojenie nesymetrického RCA a symetrického XLR konektora [1]

Symetrické konektory môžu byť použité aj v nesymetrických zariadeniach. V tomto prípade sa u konektoru XLR uzemní okrem pinu 1 aj pin 3 a podobne u konektora TRS sa spojí ring a sleeve a signál bude prenášaný iba cez špičku konektora. Podobný prípad môžeme vidieť na obrázku 2-2, kde je prepojený symetrický konektor XLR s nesymetrickým RCA.

2.2 Výhody symetrických prepojení

- Symetrické prepojenia potláčajú šum a presluchy, či už zemných prúdov alebo elektrostatickej alebo magnetickej väzby na signál.
- Symetrické prepojenia spôsobujú, že uzemňovacie slučky sú oveľa menej rušivé a nepočuteľné, takže nie je nepotrebné prerušovať uzemňovacie slučky medzi prepojenými zariadeniami s možnými smrteľnými následkami.

- Symetrické prepojenie so skutočne symetrickým výstupom poskytuje o 6 dB vyššiu úroveň signálu, čo by malo poskytnúť o 6 dB väčší dynamický rozsah. Avšak to platí iba s ohľadom na vonkajší hluk. [1]

2.3 Nevýhody symetrických prepojení

- Vyššie náklady na prepojenie a vstupné obvody zariadení.
- Existuje možnosť zavedenia fázovej chyby. Je ľahké vytvoriť nežiadúcu fázovú inverziu prehodením konektorov hot a cold pri výrobe káblov. Tento problém nemusí byť hneď spozorovaný a o to ťažšie odhaliteľný časom. Rovnaká chyba pri využití v nesymetrickom systéme úplne preruší signálovú cestu. [1]

2.4 Úrovně symetrického signálu

Väčšina zariadení je navrhnutých tak, aby spolupracovali a majú ako symetrické, tak aj nesymetrické výstupy. Všeobecný konsenzus vo svete HiFi spočíva v tom, že ak je nesymetrický výstup napríklad 1 V_{RMS} , potom symetrický výstup vytvorí zasielaním signálu na hot výstupný kolík a inverzný signál na cold. Preto celkový symetrický výstup bude mať napätie medzi hot a cold vývodom 2 V_{RMS} , takže symetrický vstup bude zosilnený o 6 dB v porovnaní s nesymetrickým vstupom, aby sa udržali konzistentné úrovne vnútorného signálu. [1]

2.5 Elektronický vs. transformátorový symetrický vstup

Symetrické prepojenia je možné realizovať pomocou transformátora alebo elektronického zosilňovača. Elektronická symetria má mnoho výhod, ako napríklad nízke náklady, malá veľkosť a hmotnosť, frekvenčná a prechodná odozva a žiadne problémy s nízkofrekvenčnou nelinearitou. Stále to ale môže byť považované za druhé najlepšie riešenie v niektorých oblastiach, kde je výkon viac adekvátny, teda pre väčšinu profesionálnych aplikácií. Symetria transformátorov má tiež svoje výhody, najmä pre prácu vo veľmi rušnom prostredí rádiovými vlnami, ale aj vážne nevýhody. Ďalšou výhodou je, že transformátory si navždy zachovávajú svoje vysoké hodnoty CMRR a nespotrebovávajú energiu ani pri vysokých signálových úrovniach. Sú nevyhnutné, ak sa vyžaduje galvanické oddelenie medzi zemou. Bohužiaľ, transformátory generujú skreslenie na nízkych frekvenciách, najmä ak boli vyrobené s minimálnou veľkosťou jadra, aby sa ušetrila hmotnosť a náklady. Môžu mať problémy s vysokofrekvenčnou reakciou a ich kompenzácia si vyžaduje starostlivo navrhnutú Zobelovú sekundárnu sieť. Nevyhnutne sú ťažké a drahé. Transformátorová symetria je preto pomerne zriedkavá, dokonca aj v profesionálnych zvukových aplikáciách. [1]

3. POMER POTLAČENIA SÚHLASNÉHO NAPÄTIA

Pomer potlačenia súhlasného napätia udáva schopnosť diferenciálneho zosilňovača potlačiť signál spoločný pre oba vstupy. Požadovaný signál by sa mal objaviť iba na jednom vstupe alebo s opačnou polaritou na oboch vstupoch. Nežiadúce signály ako šum, ktoré sa objavujú s rovnakou polaritou na oboch vstupných linkách, sú ideálne potlačené diferenciálnym zosilňovačom, pretože tieto zosilňovače sa používajú ako prostriedok na potlačenie signálov so súhlasným napätím. [3]

Meradlom schopnosti potlačenia je CMRR, z anglického common-mode rejection ratio, v preklade pomer potlačenia súhlasného napätia. Ideálny diferenciálny zosilňovač poskytuje veľmi veľké zosilnenie pre užitočné signály a nulové zosilnenie pre súhlasné signály. [3]

Skutočné diferenciálne zosilňovače používané v praxi vykazujú iba malé zosilnenie súhlasného napätia (menšie ako 1) a vysoké zosilnenie diferenčného napätia (zvyčajne niekoľko tisíc). Čím väčšie je diferenciálne zosilnenie v porovnaní so súhlasným zosilnením, tým lepší je výkon diferenciálneho zosilňovača z hľadiska potlačenia súhlasného napätia.

$$CMRR = \frac{A_{dif}}{A_{cm}} \quad (1)$$

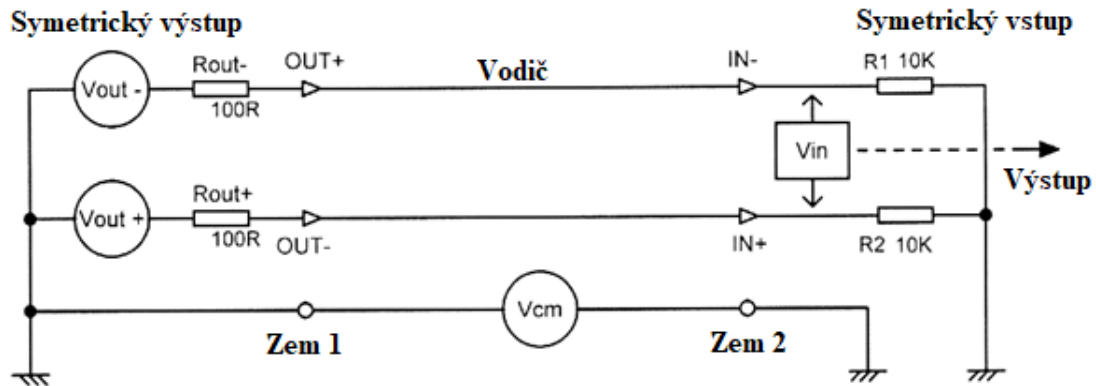
Vysoká hodnota CMRR znamená veľké diferenčné zosilnenie A_{dif} a malé súhlasné zosilnenie A_{cm} a teda čím vyššie CMRR, tým lepšie. Dobre navrhnutý zosilňovač má zvyčajne vysoké CMRR a často ho vyjadrujeme v decibeloch ako

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{dif}}{A_{cm}} \right) [dB] \quad (2)$$

CMRR 80 dB znamená, že ak sú amplitúdy diferenciálneho vstupného signálu a súhlasného šumu rovnaké, požadovaný signál na výstupe bude 10 000-krát väčšej amplitúdy ako šum. Pri veľmi vysokom CMRR bude súhlasné rušenie v podstate eliminované. [3]

Obrázok 3-1 ukazuje symetrické prepojenie obmedzené na základné prvky - hot a cold vodiče, linkové výstupy so zdrojovými odpormi R_{out+} , R_{out-} a štandardným diferenciálnym zosilňovačom na vstupný koniec. Predpokladá sa, že výstupné odpory sú presne rovnaké a symetrický vstup v prijímacom zariadení má dva presne rovnaké vstupné odpory voči zemi R_1 , R_2 . Ideálny symetrický vstupný zosilňovač sníma rozdiel napätia medzi bodmi označenými IN+ (hot) a IN- (cold) a ignoruje akékoľvek súhlasné napätie. Pomer potlačenia súhlasného napätia alebo CMRR popisuje schopnosť zariadenia ignorovať namodulované napätie na signálových linkách hot a inverznej cold. CMRR môže mať pri skreslení vyrovnanú charakteristiku na nízkych frekvenciách, ale

veľmi často sa zhoršuje pri vysokých zvukových frekvenciách a môže sa tiež zhoršovať pri veľmi nízkych frekvenciách. [1]



Obrázok 3-1 Teoretické symetrické prepojenie pre znázornenie vplyvu impedancií na CMRR [1]

Výhodou je, že úroveň súhlasného signálu je hlboko pod úrovňou nežiadúceho signálu, a tak nie je rozsah vstupu problémom. V iných technologických oblastiach, ako sú napríklad elektrokardiogramové zosilňovače, môže byť signál súhlasného napätia mnohokrát väčší ako požadovaný signál. [1]

Zjednodušený koncepčný obvod na obrázku 3-1 ukazuje potrebu vybrať správne hodnoty odporu pre dobré CMRR skôr, ako začneme uvažovať o zvyšku obvodu. Diferenčné zdroje napätia V_{out+} , V_{out-} , ktoré predstavujú skutočný symetrický výstup sú nastavené na nulu a V_{cm} , čo predstavuje súhlasné napätie v káble, je nastavené na 1 V. Výstup vyplývajúci z prítomnosti tohto zdroja napätia sa meria matematickým odčítaním napätí pri $IN+$ a $IN-$, takže nepoužívame žiadny reálny vstupný zosilňovač, ktorý by narušoval výsledky s jeho neideálnym výkonom. [1]

Tabuľka 3-1 Vplyv odchýlky odporov na teoretické CMRR pri zapojení z obrázku 3-1 [1]

R_{out+}	R_{out-}	R_{out} odchýlka	R_1	R_2	R_1, R_2 odchýlka	R_{in}/R_{out} pomer	CMRR (dB)
100	100	0	10k	10k	0	100	∞
100	101	1%	10k	10k	0	100	-80.2
100	110	10%	10k	10k	0	100	-60.2
100	100	0	10k	10.1k	1%	100	-80.3
100	100	0	10k	11k	10%	100	-61.0
100	100	0	100k	101k	1%	1000	-100.1
100	100	0	100k	110k	10%	1000	-80.8
100	100	0	1M	1.01M	1%	10,000	-120.1
100	100	0	1M	1.1M	10%	10,000	-100.8
68	68	0	20k	20.2k	1%	294	-89.5
68	68	0	20k	22k	10%	294	-70.3

Začnime s R_{out+} a R_{out-} nastavenými na 100 Ω a R_1 a R_2 nastavenými na 10 k Ω . Toto sú reálne používané hodnoty. Keď sú všetky štyri odpory presné, pri ich nominálnej hodnote je CMRR teoreticky nekonečné. Ak sa zmení jeden z výstupných odporov alebo jedna z hodnôt vstupných rezistorov o 1 %, potom CMRR značne klesne na -80 dB. Ak odchýlka od rovnosti je 10 %, CMRR sa zhoršuje na -60 dB, ako je uvedené v tabuľke 3-1. V reálnom použití je to ešte dobrá hodnota, ale pretože sme nezapočítali nedostatky operačného zosilňovača alebo inú nerovnováhu obvodov a zmenili iba jeden odpor zo štyroch, ktoré budú mať v skutočných obvodoch všetky svoje vlastné tolerancie, zdôrazňuje to potrebu uviesť veci na správnu mieru na základnej teoretickej úrovni predtým, než sa pustíme do reálnych obvodov. CMRR sa nemení s frekvenciou, pretože náš jednoduchý model nemá žiadne frekvenčné závislé komponenty. [1]

Podstata problému je, že máme dva odporové deliče, a aby sme dostali nekonečné CMRR, musia mať úplne rovnaký útlm. Ak zvýšime pomer medzi výstupnými a vstupnými odpormi znížením prvého alebo zvýšením druhého odporu, útlm sa viac zjednotí, takže zmeny v hodnote ktoréhokoľvek z odporov na ňu majú menší vplyv. Ak zvýšime vstupnú impedanciu na 100 k Ω , čo je v praxi celkom praktické (ak zanedbáme vlastný šum) je to desaťkrát lepšie, pretože R_{in}/R_{out} pomer sa zlepšil zo 100 na 1 000-krát. Teraz dostaneme CMRR -100 dB s 1% odchýlkou odporu a -80 dB s odchýlkou 10 %. Ešte vyššia vstupná impedancia 1 M Ω , ktorá je už menej praktická, zvýši R_{in}/R_{out} na 10 000 a dá nám -120 dB pre odchýlku odporu 1 % a -100 dB pre odchýlku 10 %. [1]

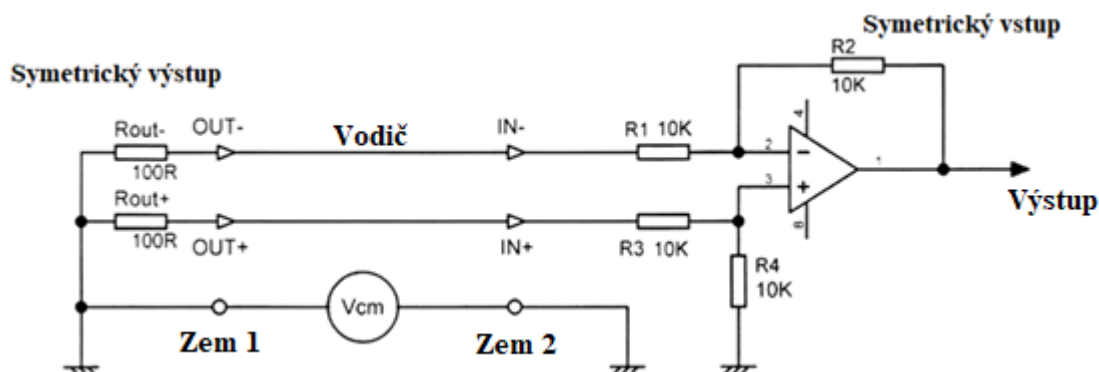
Ak budeme ignorovať potrebu zabezpečenia proti vysokofrekvenčnej nestabilite spôsobenej kapacitou káblu, môžeme znížiť výstupné impedancie na $10\ \Omega$ a tiež vrátiť vstupné impedančné odpory na $100\ \text{k}\Omega$. $R_{\text{in}}/R_{\text{out}}$ je znova $10\ 000$ a CMRR $-120\ \text{dB}$ pri odchýlke $1\ \%$ a $-100\ \text{dB}$ pre odchýlku $10\ \%$. [1]

V bežných obvodoch sa často stretávame s kombináciou výstupných odporov $68\ \Omega$ a vstupnou impedanciou $20\ \text{k}\Omega$. $68\ \Omega$ je najnižšia hodnota pre zabezpečenie proti vysokofrekvenčnej nestabilite na dlhých linkách používaných v profesionálnom zvuku. Ukazuje sa, že výstupné odpory $68\ \Omega$ a vstupná impedancia $20\ \text{k}\Omega$ dávajú teoretickú hodnotu CMRR $-89,5\ \text{dB}$ pre odchýlku $1\ \%$ jedného odporu, čo je celkom dobré. Tieto výsledky sú zhrnuté v tabuľke 3-1. [1]

Záverom je, že potrebujeme najnižšie možné výstupné impedancie a najvyššie možné vstupné impedancie na získanie maximálneho potlačenia súhlasného napätia. To je veľmi výhodné, pretože na riadenie viacerých vstupov zosilňovača a kapacity kábla sú potrebné nízke výstupné impedancie a na zníženie zaťaženia a maximalizovať počet zosilňovačov, ktoré je možné ovládať. [1]

3.1 Vplyv zosilňovača na CMRR

V predchádzajúcej časti o CMRR sme videli, že v teoretickej rovine pri výbere vysokých vstupných impedancií a nízkych výstupných impedancií sme dosiahli veľmi dobré potlačenie súhlasného napätia na symetrickom zapojení, aj keď odpory neboli dokonale vyvážené. Je to ale o niečo zložitejšie, ak nahradíme matematické odčítanie skutočným operačným zosilňovačom. Aj keď predpokladáme dokonale presné odpory, zistíme, že CMRR nie je nekonečné, pretože dva vstupy zosilňovača nie sú úplne rovnako vyvážené. Rozdielne napätie na spätnej väzbe závisí od zosilnenia operačného zosilňovača v otvorenej slučke, čo hodnotu CMRR robí konečnou a frekvenčne závislou. Existuje tiež skutočnosť, že operačné zosilňovače samy majú pomer potlačenia súhlasného napätia vysoký, ale nie nekonečný. Simulácia obvodu z obrázku 3-2 zobrazuje jednoduché symetrické prepojenie, pričom výstup predstavujú dva $100\ \Omega$ odpory pripojené k zemi zdrojového zariadenia, tu nazývanej zem 1 a obvyklej konfigurácii diferenciálneho zosilňovača na vstupnom konci, kde máme zem 2.



Obrázok 3-2 Jednoduché symetrické prepojenie na zobrazenie vplyvu vlastností OZ na CMRR [1]

Súhlasné napätie V_{cm} je teraz vložené medzi zem 1 a zem 2 a meriame signál medzi výstupom operačného zosilňovača a zemou 2. Symetrický vstupný zosilňovač má všetky štyri svoje odpory nastavené presne na 10 k Ω a operačný je modelovaný iba dvoma parametrami. Nízkočfrekvenčným zosilnením na otvorenej slučke a šírkou pásma prenosu, ktorá hovorí, kde toto zosilnenie začína klesať o 6 dB na oktávu. Vstupné impedancie operačného zosilňovača a vlastné CMRR operačného zosilňovača sú považované za nekonečné. Jeho výstupná impedancia je nastavená na nulu. [1]

Pre prvé simulácie je dokonca aj šírka pásma prenosu nekonečná, takže jediný kontakt s realitou je ten, že zosilnenie zosilňovača s otvorenou slučkou je konečné. To stačí na zobrazenie neideálnych údajov CMRR, ako ukazuje tabuľka 3-2. Vďaka nízkočfrekvenčnému zosilneniu 100 000 na otvorenej slučke, čo je typická hodnota pre zosilňovač 5532, ani dokonalé komponenty nedokážu lepšie CMRR na viac ako -94 dB. CMRR sa zobrazuje ako pomer v treťom stĺpci, aby sme videli, že CMRR je nepriamo úmerné zosilneniu, a preto chceme čo najväčšie zosilnenie. [1]

Tabuľka 3-2 Vplyv zosilnenia operačného zosilňovača na CMRR pre obvod z obrázku 3-2 [1]

Zosilnenie na otvorenej slučke	CMRR (dB)	CMRR pomer
10,000	-74.0	19.9×10^{-5}
30,000	-83.6	66.4×10^{-6}
100,000	-94.0	19.9×10^{-6}
300,000	-103.6	6.64×10^{-6}
1,000,000	-114.1	1.97×10^{-6}

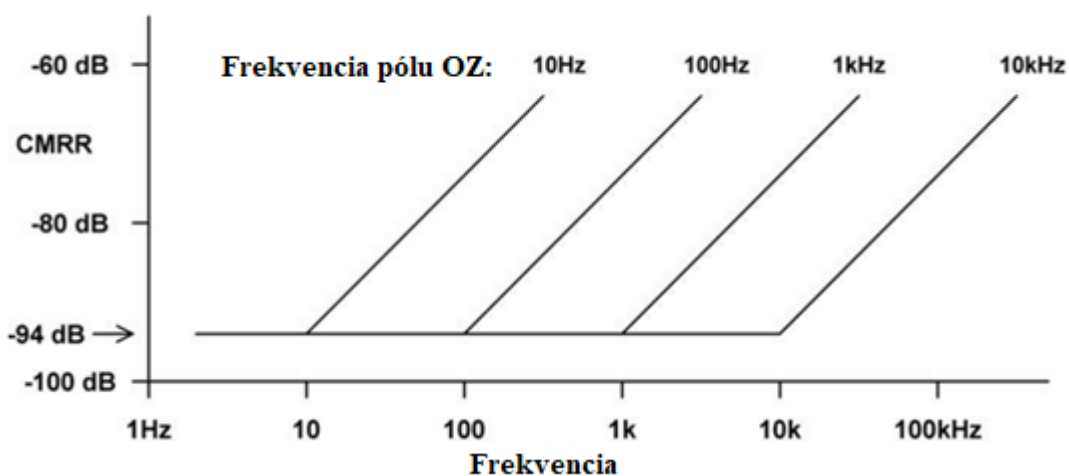
3.2 Vplyv frekvencie pólu na CMRR

Aby sme mohli preskúmať vplyv medzného kmitočtu, nastavíme nízkofrekvenčný zisk operačného zosilňovača na 100 000, čím získame CMRR -94 dB. Frekvencia pólu určuje, odkiaľ sa CMRR zhoršuje o 6 dB na októvu.

Tabuľka 3-3 Vplyv frekvencie pólu OZ na CMRR

Frekvencia pólu	Frekvencia zlomu CMRR
10 kHz	10.2 kHz
1 kHz	1.02 kHz
100 Hz	102 Hz
10 Hz	10.2 Hz

Výsledky sú zhrnuté v tabuľke 3-3, ktorá podľa očakávania ukazuje, že čím nižšia je frekvencia pólu, tým nižšia je frekvencia, na ktorej začne CMRR klesať. Obrázok 3-3 zobrazuje situáciu graficky. [1]



Obrázok 3-3 Grafické znázornenie degradovania CMRR s rozdielnou frekvenciou pólu

V tabuľke 3-4 sú uvedené parametre zosilnenia a frekvencie pólu pre niekoľko často používaných operačných zosilňovačov. Oba parametre, ale hlavne zosilnenie operačných zosilňovačov sa líšia.

Tabuľka 3-4 Zosilnenia a frekvencie pólu pre typicky využívané OZ v audio zariadeniach

Názov	Typ zariadenia	Zosilnenie	Frekvencia pólu (Hz)	CMRR (dB)
NE5532	Bipolar	100,000	100	100
LM4562	Bipolar	10,000,000	below 10	120
LT1028	Bipolar	20,000,000	3	120
TL072	FET	200,000	20	86
OP27	FET	1,800,000	3	120
OPA2134	FET	1,000,000	3	100
OPA627	FET	1,000,000	20	116

Niektoré z týchto operačných zosilňovačov majú veľmi veľké zosilnenia, ale iba pri nízkych frekvenciách. To môže mať svoje výhody v určitých prípadoch, ale pre aplikáciu v zvukových zariadeniach, ktoré bežne pracujú nad frekvenciou 50 Hz, sa budeme nachádzať nad frekvenciou pólu a teda zosilnenie bude menšie. [1]

Operačný zosilňovač má svoj vlastný pomer potlačenia súhlasného napätia a my potrebujeme vedieť, ako to ovplyvní konečné CMRR symetrického prepojenia. Ak sú všetky rezistory presné, celkové CMRR sa rovná CMRR operačného zosilňovača. Ale keďže táto hodnota je dostatočne vysoká, je veľmi nepravdepodobné, aby to bolo limitujúcim faktorom. Pomer potlačenia súhlasného napätia operačného zosilňovača sa zvyčajne zhoršuje o 6 dB na októvu nad určitou frekvenciou. To sa deje pri vyššej frekvencii ako frekvencii pólu na otvorenej slučke. Napríklad operačný zosilňovač OP27 má frekvenciu pólu približne 3 Hz, ale CMRR ostáva na úrovni 120 dB až do frekvencie 2 kHz a pri 20 kHz je stále nad 100 dB. [1]

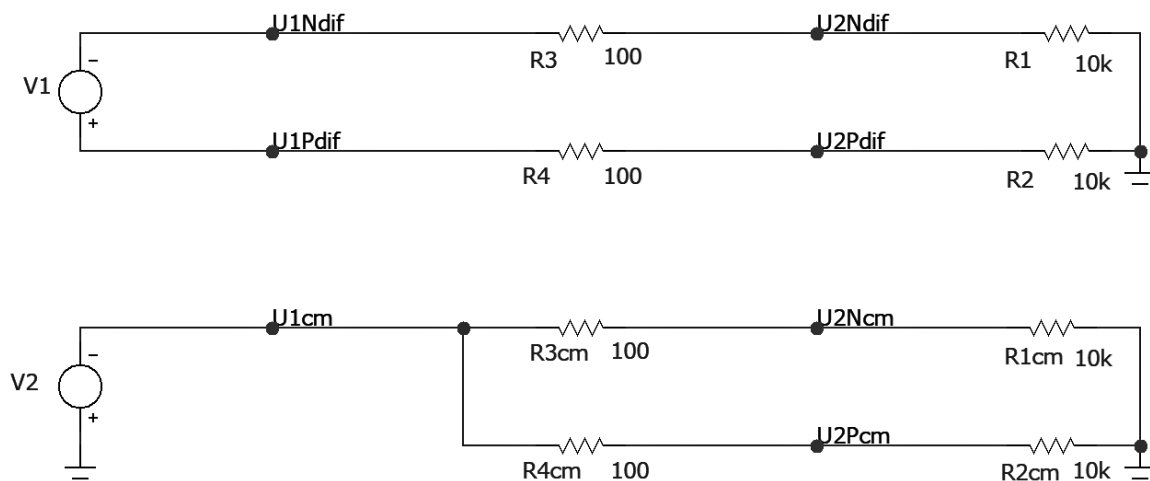
4. SIMULÁCIE V PROGRAME MICRO-CAP

Pomocou simulácií prebiehajúcich v programe Micro-Cap overíme výsledky a simulácií z knihy [1]. Obvody sú zjednodušené na základné prvky pre jednoduchosť pochopenia, simulácií a presnosť výsledkov. Zameriavame sa na symetrické výstupy a vstupy, konkrétne na parameter CMRR – pomer potlačenia súhlasného napätia, ktorý popisuje najväčšiu výhodu symetrických zapojenia v porovnaní s nesymetrickým.

4.1 Vplyv odchýlky odporov na CMRR bez operačného zosilňovača

Na obrázku 4-1 vidíme simulovaný obvod v programe Micro-Cap. Môžeme ho rozdeliť na dve časti dvoma spôsobmi. Ľavá časť reprezentuje symetrický výstup a pravá symetrický vstup. Vodiče medzi nimi si tiež môžeme predstaviť aj ako káblové prepojenie medzi dvoma odlišnými zariadeniami. Rozdelením na horný a spodný obvod sa snažíme oddeliť užitočný signál, ktorý reprezentuje zdroj V1 v hornom obvode a nežiadúce rušenie v podobe súhlasného napätia na oboch vodičoch, ktoré simulujeme pomocou zdroja V2 v spodnom obvode. Oba zdroje sú jednotkové zdroje napätia.

Miesta U1 a U2 určujú, kde meriame napätie pre neskorší výpočet CMRR. Ndif a Pdif reprezentuje negatívnu a pozitívnu časť diferenčného napätia a rovnako Ncm a Pcm predstavujú súhlasné napätie (common-mode).



Obrázok 4-1 Simulovaný obvod bez operačného zosilňovača

Teraz, keď máme hotový obvod, môžeme pokračovať výpočtom CMRR. V simulačnom programe Micro-Cap sme zvolili analýzu kmitočtových závislostí obvodových veličín v harmonickom ustálenom stave. V tejto chvíli síce nemáme v obvode žiadne frekvenčne závislé komponenty, ale neskôr nám pribudnú. Vzorec pre výpočet CMRR si pomocou normy pre meranie CMRR [4] upravíme na

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_d}{|A_{cm}|} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{1cm} U_{2dif}}{U_{1dif} U_{2cm}} \right) \quad [dB] \quad (3)$$

a konkrétne pre náš prípad ho do programu Micro-Cap vložíme ako

$$dB \left(\frac{v(U1cm) * (v(U2Pdif) - v(U2Ndif))}{(v(U1Pdif) - v(U1Ndif)) * (v(U2Pcm) - v(U2Ncm))} \right) \quad (4)$$

čo je iba rozpísaná verzia normovaného vzorca podľa [4]. Pomocou zmeraných napätí v určených bodoch dokážeme vykresliť frekvenčnú charakteristiku CMRR.

V simulácii meníme hodnoty odporov podľa tabuľky 4-1, v ktorej sú uvedené namerané hodnoty CMRR v decibeloch. Pre zdôraznenie, že sa jedná o ten istý obvod, iba v zapojení pre meranie potlačenia súhlasného napätia, sú názvy odporov druhého obvodu rovnako očíslované a doplnené o cm, teda common-mode.

Tabuľka 4-1 Simulovaný vplyv odchýlky odporov na CMRR pri zapojení z obrázku 4-1

R₄ [Ω]	R₃ [Ω]	R_{out} odchýlka	R₁ [Ω]	R₂ [Ω]	R_{1, R₂} odchýlka	R_{in/R_{out}} pomer	CMRR [dB]	
							D. Self	Simulácie
100	100	0%	10k	10k	0%	100	∞	999,91
100	101	1%	10k	10k	0%	100	-80,2	80,09
100	110	10%	10k	10k	0%	100	-60,2	60,09
100	100	0%	10k	10k1	1%	100	-80,3	80,17
100	100	0%	10k	11k	10%	100	-61,0	60,91
100	100	0%	100k	101k	1%	1000	-100,1	100,10
100	100	0%	100k	110k	10%	1000	-80,8	80,84
100	100	0%	1M	1M01	1%	10000	-120,1	120,09
100	100	0%	1M	1M1	10%	10000	-100,8	100,83

V prvom riadku hodnota CMRR šplhá skoro k 1000 dB, čo nie je prekvapivé, pretože máme nulové odchýlky odporov a teoretické CMRR by v tomto prípade malo byť nekonečné. Je iba na simulačnom programe ako sa s touto skutočnosťou vyrovná.

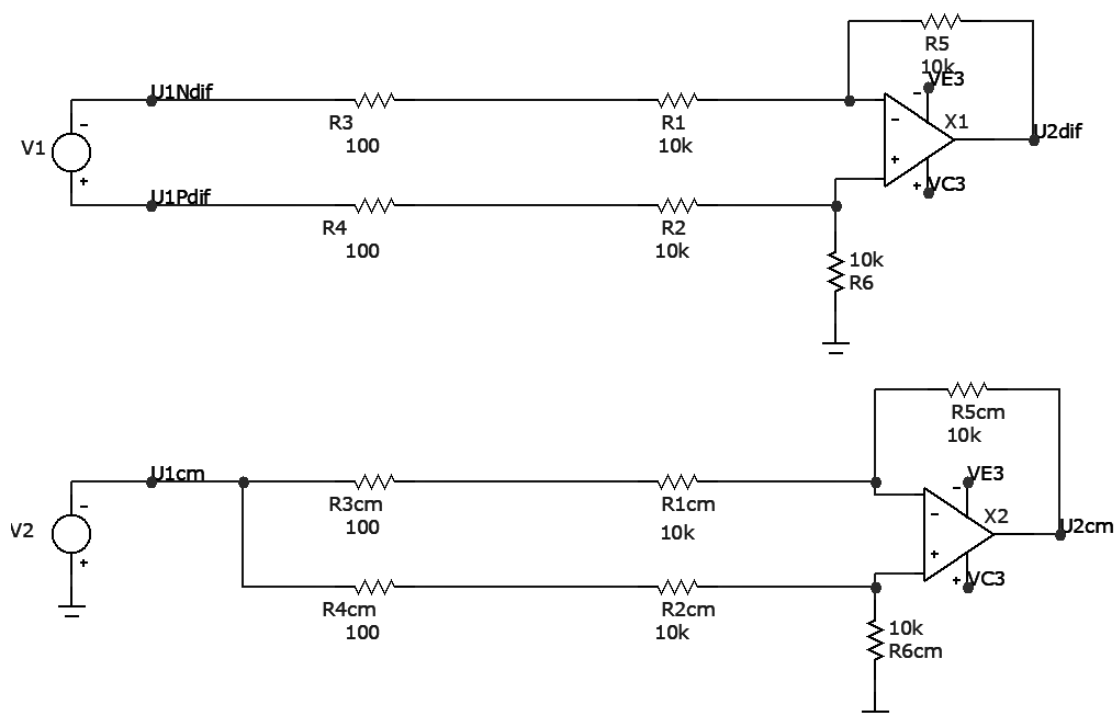
Môžeme si všimnúť, že so zväčšujúcou sa odchýlkou, či už výstupných alebo vstupných odporov, sa CMRR zhoršuje. Keď ale zväčšujeme vstupné odpory, zlepšujú sa aj hodnoty CMRR. Z toho môžeme ľahko vyvodiť, že čím väčšie budú vstupné odpory, tým viac potlačíme súhlasné napätie na vodičoch a tým menej nám budú prekážať odchýlky odporov.

4.1.1 Porovnanie s výsledkami z knihy Small signal audio design

Namerané hodnoty z knihy Small signal audio design nájdeme v tabuľke 4-1 v predposlednom stĺpci označenom ako D. Self. Najväčší rozdiel je v tom, že naše hodnoty sú kladné, zatiaľ čo v knihe negatívne. CMRR je možné merať a počítať viacerými spôsobmi. Vzorec, ktorý pán D. Self používa, v knihe nie je uvedený. Môžeme sa teda iba domnievať, že sa jedná o nejakú zjednodušenú verziu alebo prehodenie čitateľa a menovateľa vo vzorci. Hodnoty CMRR sa bežne zvyknú vyjadrovať v kladnej rovine, takže sa s najväčšou pravdepodobnosťou jedná iba o malú numerickú chybu. Túto skutočnosť môžeme ignorovať a hodnoty považovať za kladné. Hodnoty sú si inak veľmi podobné a logický záver z nich vyplývajúci súhlasí s tým našim. Malé odchýlky môžu byť zapríčinené zaokrúhľovaním a iným simulačným programom, ktorý bol zvolený. Pán D. Self využíva pre svoje simulácie program Spice.

4.2 Vplyv zosilnenia operačného zosilňovača na CMRR

V obvode na obrázku 4-2 pribudli dva odpory a hlavne operačný zosilňovač. Vybrali sme operačný zosilňovač TL071 druhej úrovne, čo nám umožňuje nastaviť jeho nízko-frekvenčné zosilnenie a šírku pásma prenosu. Šírka pásma prenosu sa v priebehu simulácií nemení a je nastavená na 2,95 Hz. Táto hodnota je reálna z praxe a v neskorších meraniach budeme používať práve takýto operačný zosilňovač. Tomu sa ale budeme venovať neskôr.



Obrázok 4-2 Simulovaný obvod s operačným zosilňovačom

Pridaním operačných zosilňovačov sa nám zmenšil počet bodov, na ktorých meriame napätie, pre výpočet CMRR, preto je potrebné upraviť aj zadávaný vzorec do Micro-Capu.

$$dB\left(\frac{v(U1cm)*v(U2dif)}{(v(U1Pdif)-v(U1Ndif))*v(U2cm)}\right) \quad (5)$$

Pôvodný vzorec ale ostáva úplne rovnaký, upravili sme iba zápis v programe.

V tejto simulácii sa venujeme vplyvu zosilnenia operačného zosilňovača na CMRR podľa tabuľky 4-2. Zanedbávame vplyv šírky pásma prenosu.

Tabuľka 4-2 Simulovaný vplyv zosilnenia operačného zosilňovača na CMRR pri zapojení z obrázku 4-2

Zosilnenie na otvorenej slučke	CMRR [dB]	
	D. Self	Simulácie
10000	-74,0	113,47
30000	-83,6	123,05
100000	-94,0	133,50
300000	-103,6	143,04
1000000	-114,1	153,47

Z nameraných hodnôt môžeme potvrdiť, že potlačenie súhlasného napätia sa zlepšuje s úrovňou zosilnenia operačného zosilňovača.

4.2.1 Porovnanie s výsledkami z knihy *Small signal audio design*

Znova môžeme výsledky porovnávať v kladnej rovine. V tejto simulácii nameral pán D. Self odlišné výsledky než my. Malú odchýlku môže spôsobovať výber iného zosilňovača. V knihe je použitý zosilňovač 5532, zatiaľ čo my používame TL071, keďže sme nemali možnosť výberu rovnakého operačného zosilňovača.

Aj keď sa namerané hodnoty nezhodujú presne, zhoduje sa ich logika a záver vyplývajúci z tejto simulácie. S rastúcim nízkofrekvenčným zosilnením sa zlepšujú hodnoty potlačenia súhlasného napätia.

4.3 Vplyv odchýlky vstupných odporov a zosilnenia na CMRR

V tejto simulácii znova použijeme obvod z obrázku 4-2, takže vstup pre simulačný program ostane nepozmenený. Zaujímá nás vplyv zosilnenia operačného zosilňovača na CMRR pri rôznych odchýlkach vstupných odporov. Nastavujeme hodnoty podľa tabuľky 4-3. Šírku pásma prenosu neberieme do úvahy a považujeme ju za nekonečnú.

Tabuľka 4-3 Simulovaný vplyv odchýlky vstupných odporov a zosilnenia na CMRR pri zapojení z obrázku 4-2

R_1 [Ω]	R_1 odchýlka	Zosilnenie	CMRR [dB]	
			D. Self	Simulácie
10k	0%	10^5	-94,0	133,51
10.001k	0,01%	10^5	-90,6	86,03
10.01k	0,10%	10^5	-66,5	66,07
10.1k	1%	10^5	-46,2	46,11
11k	10%	10^5	-26,6	26,47
10k	0%	10^6	-114,1	153,49
10.001k	0,01%	10^6	-86,5	86,06
10.01k	0,10%	10^6	-66,2	66,07
10.1k	1%	10^6	-46,2	46,11
11k	10%	10^6	-26,6	26,46

Môžeme pozorovať, ako aj s malými zmenami vstupných odporov dochádza k výraznému zhoršeniu potlačenia súhlasného napätia. Ak sú odpory presné, väčšie zosilnenie operačného zosilňovača zlepši CMRR, ale aj s malými odchýlkami sa dostávame na podobné úrovne CMRR ako pri slabšom zosilnení.

Z toho vyplýva, že je dôležitejšie zabezpečiť čo najpresnejšie odpory v blízkosti operačného zosilňovača ako veľkosť zosilnenia, pre čo najlepšie potlačenie súhlasného napätia.

4.3.1 Porovnanie s výsledkami z knihy Small signal audio design

Aj tu zanedbáme negatívne hodnoty a porovnávame ich v kladnej rovine. Pri zapojení bez odchýlky dosahujeme lepších hodnôt CMRR, ale s narastajúcou odchýlkou sú si hodnoty podobnejšie. Výsledky v knihe sa síce mierne líšia, ale logicky záver z nich súhlasí s tým naším. Čiastočne to môže byť zapríčinené odlišným výberom operačného zosilňovača. Záver je ale rovnaký. Aj pri malých zmenách odporov v blízkosti operačného zosilňovača hodnota CMRR prudko klesá a nepomôže ani zväčšené zosilnenie operačného zosilňovača.

5. MERANIA OBVODU NA NEPÁJIVOM POLI

Obvody sú zostavené podľa obrázku 4-1 pre meranie bez operačného zosilňovača a 4-2 pre meranie s operačným zosilňovačom. Otestovali sme viacero spôsobov zostavenia obvodu a pokúšali sme sa riadiť normou [4] pre meranie potlačenia súhlasného napätia. To sme ale vylúčili, pretože táto norma nepočíta s tak jednoduchým zariadením a je určená skôr pre väčšie zariadenia ako zosilňovače a iné zariadenia typu blackbox, kde vyváženie vstupov nemusí byť úplne presné. Postupovali sme rovnakým spôsobom ako u simulácií, pre zachovanie čo najväčšej jednoduchosti a presnosti.

5.1 Použité súčiastky a prístroje

Meraný obvod je zostavený na nepájivom kontaktnom poli Bread Board ZY-204. Odchýlka používaných odporov nepresahuje 1%. Používame operačný zosilňovač TL071CP, so zosilnením 1778279 a šírkou pásma prenosu približne 2,95 Hz. Presnejšie informácie môžeme čerpať z datalistu [5]. Tento operačný zosilňovač je napájaný pomocou stolného napájacieho zdroja Agilent E3630A napätím ± 15 V. Ako generátor signálu používame Agilent 33521A, na ktorom generujeme sínusový priebeh s frekvenciami podľa tabuliek 5-1 a 5-2 a amplitúdou 10 V_{PP}. Pre meranie napätí využívame dva digitálne multimetre Keysight 34461A.

5.2 Vplyv odchýlky odporov na CMRR bez operačného zosilňovača

Podobne ako v simuláciách, meníme rozváženie odporov a sledujeme vplyv na hodnotu CMRR. Teoreticky by hodnoty nemali byť frekvenčne závislé, ale v praxi tomu tak nie je, preto meriame v základnom priereze počutelného frekvenčného spektra. Kvôli presnosti použitých odporov sme sa rozhodli vylúčiť meranie s 1% odchýlkou a nahradili ho 20% odchýlkou. Presné namerané hodnoty napätí, z ktorých sme výpočtom určili CMRR, nájdeme v prílohe A.

Tabuľka 5-1 Zmeraný vplyv odchýlky odporov na CMRR pri zapojení z obrázku 4-1

R₄	R₃	R₁	R₂	CMRR [dB]				
				D. Self	Simulácie	Namerané		
[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]			100 Hz	1 kHz	10 kHz
100	100	10k	10k	∞	999,91	84,61	80,09	61,98
100	101	10k	10k	-80,2	80,09	-	-	-
100	110	10k	10k	-60,2	60,09	60,70	60,65	57,68
100	120	10k	10k	-	54,07	54,06	54,05	52,86
100	100	10k	10k1	-80,3	80,17	-	-	-
100	100	10k	11k	-61,0	60,91	60,47	60,43	58,22
100	100	10k	12k	-	55,64	55,43	55,42	54,63
100	100	100k	101k	-100,1	100,10	-	-	-
100	100	100k	110k	-80,8	80,84	81,06	78,48	61,88
100	100	100k	120k	-	75,57	75,59	74,69	61,76
100	100	1M	1M01	-120,1	120,09	-	-	-
100	100	1M	1M1	-100,8	100,83	-	81,70	61,83
100	100	1M	1M2	-	95,56	-	81,53	61,83

Z nameraných hodnôt môžeme jasne pozorovať, že pri prvom zapojení zďaleka nie sme schopní dosiahnuť tak dobrých hodnôt, ako sme dosiahli pri simulovaní, čo môžeme vidieť v stĺpci Simulácie. To je veľmi ľahko vysvetliteľné presnosťou použitých odporov. Pri teoreticky ideálnom zapojení v prvom riadku dosahujeme o niečo málo lepšie hodnoty ako pri 1% rozvážení v druhom a piatom riadku, čomu odpovedá presnosť použitých odporov. Preto tieto výsledky môžeme považovať za uspokojivé.

V posledných dvoch riadkoch na frekvencii 100 Hz nie sme schopní namerať akékoľvek hodnoty s dostatočnou presnosťou, pretože súhlasné napätie U_{2CM} je príliš malé. Potrebovali by sme zväčšiť amplitúdu signálu na generátore, kde sme už dosiahli maximum. To ale znamená, že hodnota CMRR je v týchto prípadoch najvyššia, akú sme dosiahli. Síce máme vyššiu hodnotu ako v prvom riadku, čo ale dáva zmysel, ak berieme do úvahy presnosť našich odporov. Tým potvrdzujeme, že čím väčšie budú vstupné odpory, tým viac potlačíme súhlasné napätie na vodičoch a tým menej nám budú prekážať odchýlky odporov.

5.3 Vplyv odchýlky vstupných odporov na CMRR

Znova využijeme zapojenie s operačným zosilňovačom podľa obrázku 4-2 a budeme meniť hodnotu odporu R_1 podľa tabuľky 5-2. V tomto meraní máme iné zosilnenie ako pri simuláciách, preto tieto hodnoty nemôžeme úplne porovnávať, keďže sme potvrdili,

že s väčším zosilnením dosahujeme lepších hodnôt CMRR. Znova sme vyradili 1% odchýlku z rovnakých dôvodov ako v predchádzajúcom meraní. Presné namerané hodnoty napätí, z ktorých sme výpočtom určili CMRR, nájdeme v prílohe B.

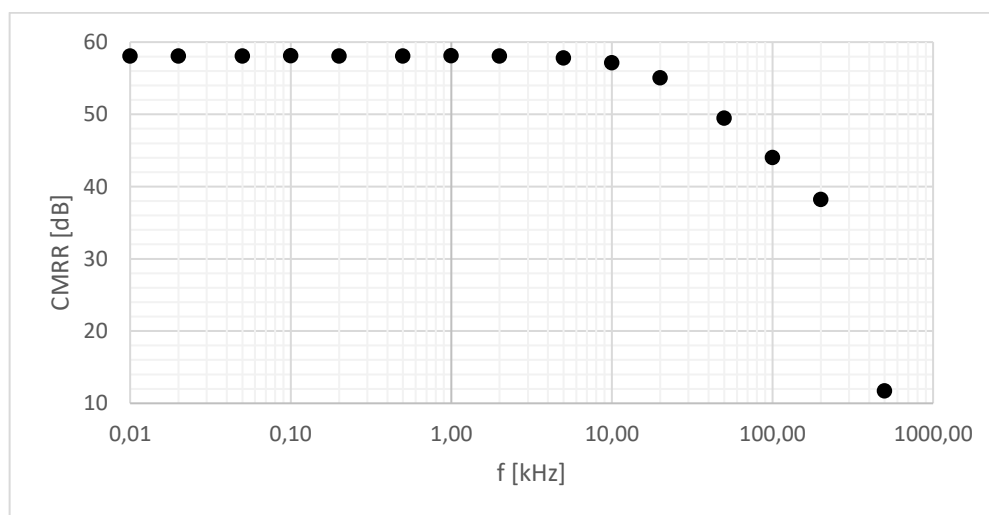
Tabuľka 5-2 Zmeraný vplyv odchýlky vstupných odporov a zosilnenia na CMRR pri zapojení z obrázku 4-2

R_1 [Ω]	R_1 odchýlka	Zosilnenie	CMRR [dB] Namerané		
			100 Hz	1 kHz	10 kHz
10k	0%	1778279	57,47	57,46	56,62
11k	10%	1778279	26,25	26,24	26,25
12k	20%	1778279	20,73	20,73	20,74

Aj keď hodnoty nemôžeme porovnávať, stále môžeme s istotou povedať, že je dôležité zabezpečiť čo najpresnejšie odpory v blízkosti operačného zosilňovača pre čo najlepšie potlačenie súhlasného napätia.

5.4 Šírka pásma prenosu u OZ TL071CP

Závislosť CMRR na frekvencii je meraná v zapojení z obrázku 4-2. Využívame ideálne zapojenie s výstupnými odpormi 100 Ω a vstupnými 10 k Ω .



Obrázok 5-1 Závislosť CMRR na frekvencii u OZ TL071CP

CMRR zvykne degradovať o 6 dB na októvu zvyčajne vyššie ako je jeho frekvencia pólu. Je tomu tak aj v tomto prípade. Ako môžeme vidieť, CMRR začína viditeľne klesať až na 10 kHz, aj keď má frekvenciu pólu 3 Hz a aj to iba o jednotky decibelov.

6. LABORATÓRNA ÚLOHA DEMONŠTRUJÚCA VLASTNOSTI SYMETRICKÝCH PREPOJENÍ

Cieľom tejto práce je zhrnúť poznatky v oblasti prenášania audio signálu s hlavným zameraním sa na pomer potlačenia súhlasného napätia u symetrického vstupu a aspektov vplývajúcich naňho a týmto spôsobom pripraviť podklad pre vytvorenie laboratórnej úlohy. Laboratórna úloha by mala tieto poznatky reprezentovať praktickou formou. Naším cieľom nie je vytvoriť doslovné zadanie, ktoré by bolo pripravené na použitie, ale navrhnúť, čo by sa v úlohe malo nachádzať.

Z osobnej skúsenosti s nedostatočnou praxou s reálnym vytváraním obvodov navrhujeme, aby riešiteľ úlohy sám zhotovil obvod podľa obrázkov 3-1 a 3-2 a postupoval rovnakým spôsobom, aký sme využili pri meraní tejto úlohy. V prípade potreby znázornenia zapojenia meracích zariadení je možné si pomôcť aj obrázkami 4-1 a 4-2 pre zapojenie bez a s operačným zosilňovačom. Obvod môže byť zhotovený ako na nepájivom poli, pre pohodlnosť zámenny odporov a prepojení medzi diferenčným a súhlasným napätím, tak na plošnom spoji, kde bude môcť nadobudnúť skúsenosti so spájkovaním obvodov. V tomto prípade by bolo vhodné schéma zariadenia upraviť a navrhnúť tak, aby sme pomocou prepínačov vedeli meniť zapojenie s a bez operačného zosilňovača a tiež použiť premenné rezistory. Náročnosť vytvorenia takéhoto obvodu je skoro rovnaká ako ručné prepájanie súčiastok na nepájivom poli.

Podobne ako v tejto práci, najprv by sa skúmal vplyv výstupných a vstupných odporov na pomer potlačenia súhlasného napätia, kde je možné využiť tabuľku 4-1. Určite odporúčame aspoň prvý riadok bez rozváženia odporov a odporúčame aj výber vlastných hodnôt odporov, s cieľom dosiahnuť určitú vopred stanovenú hodnotu CMRR. Pri výpočte CMRR z nameraných hodnôt odporúčame využiť vzorec (3).

V druhej časti úlohy riešiteľ využije zapojenie s operačným zosilňovačom a ideálne aj viacerými zosilňovačmi, aby mohol porovnať jednotlivé výsledky a vplyv vlastných parametrov operačného zosilňovača. Ďalej je vhodné preskúmať vplyv odchýlky vstupného odporu R_1 v tomto zapojení, pričom môže postupovať podľa tabuľky 5-2. Riešiteľovi úlohy môžeme poskytnúť iba názov operačného zariadenia s úlohou, aby sám dohľadal potrebné informácie ako zosilnenie a frekvencia pólu a v prípade potreby si tieto údaje vypočítal, ak nie sú poskytnuté priamo v datalistе zariadenia. To si dáva za cieľ zoznámiť riešiteľa s dôležitosťou datalistov zariadení a prácou s nimi.

V tretej časti úlohy bude potrebné zmerať frekvenčnú závislosť CMRR pri zapojení s operačným zosilňovačom bez rozváženia odporov. Voliteľne možnosť zmerať frekvenčnú závislosť CMRR aj s rozvážením odporov. Túto závislosť potom vyniesť do grafu a okomentovať.

Tieto merania by mali byť obohatené o ich simulácie v ľubovoľnom simulačnom programe, s následným porovnaním výsledkov a prípadným zamyslením sa nad rozdielnymi hodnotami.

Riešiteľ tejto úlohy by mal pochopiť vplyv vstupných a výstupných odporov na pomer potlačenia súhlasného napätia v zapojení bez operačného zosilňovača a teda aj potrebu voliť čo najnižšie výstupné a čo najvyššie vstupné impedancie, pre čo najlepšie hodnoty CMRR. Ďalej pochopiť ako na parameter CMRR vplývajú vlastné špecifikácie operačného zosilňovača zo zapojenia s operačným zosilňovačom a presnosť odporov v blízkosti operačného zosilňovača. V zapojení s operačným zosilňovačom tiež získať predstavu o vplyve frekvencií pólu na frekvenčnú charakteristiku. Pri tom všetkom nadobudnúť praktické skúsenosti s vytváraním jednoduchých obvodov či už na nepájivom poli alebo cestou spájkovania na plošnom spoji. V prípade potreby, viac informácií nájde v zdrojoch [1] a [6].

ZÁVER

Cieľom práce je preštudovať princíp a vlastnosti symetrických prepojení výstupov a vstupov zvukových zariadení. Ďalej popísať, za akým účelom sa využívajú a akým nežiadúcim vplyvom zabraňujú. Práca sa zameriava predovšetkým na činiteľ potlačenia súhlasného napätia a skúma vplyv výstupných a vstupných odporov, zosilnenia a lomového kmitočtu použitého zosilňovača. Teoretické znalosti nájdeme v prvých troch kapitolách. Uvedené poznatky sú doložené počítačovými simuláciami a meraniami na zhotovenom prípravku. Tieto ciele sa nám podarilo splniť.

Štvrtá kapitola pomocou simulácií overuje zhrnuté poznatky. Prvá podkapitola pojednáva o vplyve odchýlky výstupných a vstupných odporov na CMRR, bez použitia operačného zosilňovača. Podarilo sa nám potvrdiť, že s narastajúcou odchýlkou odporov sa zhoršuje hodnota potlačenia súhlasného napätia. Ak tomu chceme predísť, je potrebné voliť čo najnižšie výstupné a čo najvyššie vstupné impedancie. Toto potvrdzujú aj reálne merania na zhotovenom prípravku. Druhá podkapitola potvrdzuje, že s rastúcim zosilnením operačného zosilňovača rastie aj hodnota CMRR. Tretia podkapitola druhej časti práce sa venuje vplyvu odchýlky vstupných odporov a zosilnenia na CMRR. Dospeli sme k záveru, že zväčšenie zosilnenia zlepšuje hodnoty CMRR, ale iba ak nemáme odchýlku na odporoch. Preto je dôležitejšie voliť čo najpresnejšie odpory v blízkosti operačného zosilňovača, ako čo najväčšie zosilnenie.

Piata kapitola sa venuje meraniam na zhotovenom prípravku pre overenie znalostí na reálnych a neideálnych súčiastkach. Namerané hodnoty sme porovnali medzi sebou a s hodnotami z knihy *Small signal audio design* a aj keď sa hodnoty nezhodovali presne, logické závery z nameraných hodnôt korešpondujú s tými našimi.

Šiesta kapitola sa venuje návrhu vytvoria laboratórnej úlohy demonštrujúcej vlastnosti symetrických prepojení s hlavným zameraním sa na pomer potlačenia súhlasného napätia a aký vplyv naňho má šírka pásma prenosu, odchýlky odporov a zosilnenie operačného zosilňovača.

LITERATÚRA

- [1] SELF, Douglas. *Small signal audio design* [online]. Second edition. Burlington: Focal Press, 2015 [cit. 2020-05-30]. ISBN 978-1-315-88537-7. Dostupné z: <https://nvhrbiblio.nl/biblio/boek/Self%20-%20Small%20signal%20audio%20design-2e.pdf>
- [2] BARRY, John R., Edward A. LEE, David G. MESSERSCHMITT a Edward A. LEE. *Digital communication*. 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2004. ISBN 9780792375487.
- [3] MAESTRE, Susie. *What is Common-Mode Rejection Ratio in Op-amps?* [online]. 2011-01-11 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-common-mode-rejection-ratio-in-op-amps>
- [4] ČSN EN 60268-3 ed. 2 (368305). *Elektroakustická zařízení – Část 3: Zesilovače*. © IEC:2013. 8590963944111.
- [5] Texas Instruments. [Online katalogový list]. TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers. © 2021 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071.pdf?ts=1621400261319>
- [6] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. ISBN 978-8-214-4719-6.

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A – NAMERANÉ HODNOTY Z TABUĽKY 5-1.....	40
Príloha B – NAMERANÉ HODNOTY Z TABUĽKY 5-2.....	41
Príloha C – NAMERANÉ HODNOTY Z OBRÁZKU 5-1.....	42

PRÍLOHA A – NAMERANÉ HODNOTY Z TABUĽKY 5-1

R4 [Ω]	R3 [Ω]	R1 [Ω]	R2 [Ω]	100 Hz				1 kHz				10 kHz			
				U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]	U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]	U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]
100	100	10k	10k	7,058	6,987	7,005	0,408	7,058	6,987	7,004	0,686	7,057	6,986	7,003	5,521
100	110	10k	10k	7,057	6,984	7,005	6,398	7,056	6,983	7,004	6,430	7,057	6,983	7,004	9,050
100	120	10k	10k	7,056	6,980	7,005	13,730	7,058	6,980	7,004	13,740	0,705	0,697	7,004	15,760
100	100	10k	11k	7,059	6,991	7,008	6,577	7,058	6,991	7,008	6,605	7,058	6,990	7,008	8,521
100	100	10k	12k	7,060	6,995	7,011	11,750	7,060	6,995	7,010	11,763	7,059	6,994	7,010	12,895
100	100	100k	110k	7,075	7,067	7,070	0,625	7,074	7,067	7,069	0,841	7,074	7,066	7,069	5,684
100	100	100k	120k	7,075	7,067	7,070	1,174	7,075	7,067	7,070	1,301	7,075	7,066	7,069	5,765
100	100	1M	1M1	7,076	7,074	7,076	0,005	7,076	7,074	7,076	0,582	7,076	7,073	7,075	5,727
100	100	1M	1M2	7,076	7,074	7,076	0,000	7,076	7,074	7,076	0,593	7,076	7,073	7,075	5,729

PRÍLOHA B – NAMERANÉ HODNOTY Z TABUĽKY 5-2

R1 [Ω]	R1 odchýlka	Zosilnenie	100 Hz				1 kHz				10 kHz			
			U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]	U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]	U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]
10k	0%	1778279	7,059	6,974	7,041	9,304	7,058	6,974	7,041	9,323	7,057	6,974	7,040	10,269
11k	10%	1778279	7,060	6,648	7,042	323,098	7,060	6,648	7,042	323,145	7,059	6,650	7,042	323,191
12k	20%	1778279	7,061	6,354	7,043	582,850	7,060	6,354	7,043	582,827	7,060	6,361	7,042	582,846

PRÍLOHA C – NAMERANÉ HODNOTY Z OBRÁZKU 5-1

f [kHz]	U1 [V]	U2 [V]	U1cm [V]	U2cm [mV]	CMRR [dB]
0,01	7,0573	6,9744	7,0384	8,6620	58,094
0,02	7,0576	6,9746	7,0390	8,6660	58,091
0,05	7,0579	6,9747	7,0393	8,6680	58,089
0,1	7,0579	6,9868	7,0397	8,6690	58,104
0,2	7,0585	6,9752	7,0400	8,6740	58,084
0,5	7,0584	6,9752	7,0403	8,6630	58,096
1	7,0576	6,9868	7,0400	8,6730	58,100
2	7,0574	6,9741	7,0392	8,7020	58,055
5	7,0571	6,9739	7,0385	8,9360	57,824
10	7,0570	6,9860	7,0388	9,7010	57,126
20	7,0585	6,9770	7,0392	12,2860	55,061
50	7,0593	6,9848	7,0389	23,3260	49,501
100	7,0644	7,0110	7,0423	43,9300	44,033
200	7,0695	7,0171	7,0415	85,5980	38,239
500	0,1328	0,0159	0,0186	0,5760	11,743
1000	0,0004	0,0021	0,0006	-	-